



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

**Untersuchung der Zuverlässigkeit
und der Ausfallwahrscheinlichkeit
von drei Varianten
des Druckentlastungssystems für HTR**

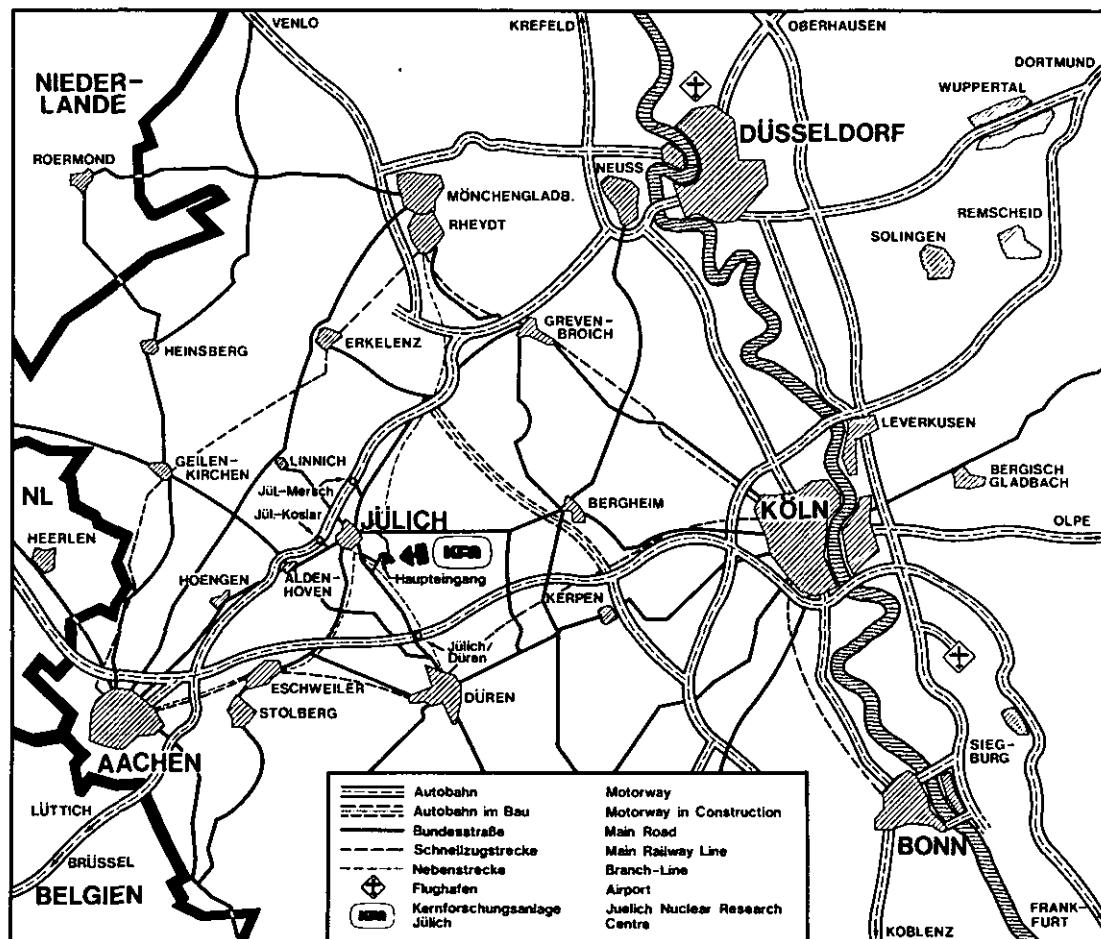
von

G. Schufmann

Jül - Spez - 124

August 1981

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 124

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül - Spez-124

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: (02461) 61-0 · Telex: 833556 kfa d

**Untersuchung der Zuverlässigkeit
und der Ausfallwahrscheinlichkeit
von drei Varianten
des Druckentlastungssystems für HTR**

von

G. Schufmann

UNTERSUCHUNG DER ZUVERLÄSSIGKEIT UND DER AUSFALLWAHRSCHEINLICH-
KEIT VON DREI VARIANTEN DES DRUCKENTLASTUNGSSYSTEMS FÜR HTR

von

G. Schufmann

KURZFASSUNG

Das Druckentlastungssystem des Primärkreislaufes eines HTR soll bei unzulässigem Druckanstieg öffnen, so daß sich der Druck bis zu einem definierten Niveau abbauen kann.

Bei normalem Betrieb muß das System zuverlässig geschlossen bleiben.

Die Eigenschaften 'sicheres Öffnen bei Überdruck' und 'sicheres Abdichten bei Normalbetrieb' sind in gewisser Hinsicht komplementär.

In dieser Untersuchung werden für beide Funktionen des Druckentlastungssystems für drei Varianten Zuverlässigkeitswerte ermittelt und im Anschluß bewertet.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung und Aufgabenstellung
2. Zuverlässigkeitsbetrachtungen von System 1
 - 2.1 Systembeschreibung
 - 2.2 Häufigkeit für ein Versagen des Entlastungssystems 1 bei Erreichen des Ansprechdruckes
 - 2.3 Häufigkeit für eine unbeabsichtigte Druckentlastung durch Versagen des Systems 1
3. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zu System 2
 - 3.1 Systembeschreibung
 - 3.2 Häufigkeit für ein Versagen des Entlastungssystems 2 bei Erreichen des Ansprechdruckes
 - 3.3 Häufigkeit für eine unbeabsichtigte Druckentlastung durch das Versagen des Entlastungssystems 2
4. Zuverlässigkeitsbetrachtungen zu System 3
 - 4.1 Systembeschreibung
 - 4.2 Häufigkeit für ein Versagen des Entlastungssystems 3 bei Erreichen des Ansprechdruckes
 - 4.3 Häufigkeit für eine unbeabsichtigte Druckentlastung durch Versagen des Entlastungssystems 3
5. Bewertung der Varianten der Druckentlastungssysteme
6. Anhang
7. Verzeichnis der Abbildungen
8. Verzeichnis der Tabellen
9. Literaturverzeichnis

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Druckentlastungseinrichtungen, die das Überschreiten eines maximalen Druckes in Behältern verhindern sollen, haben neben dieser Aufgabe oft eine wichtige Nebenfunktion. Soll der Behälter z.B. wegen eines gefährlichen Inhaltes nur bei Gefahr des Berstens geöffnet werden, so muß das Druckentlastungssystem im Normalbetrieb die Dichtigkeit des Behälters sicherstellen.

Typisch für diesen Fall ist das Druckentlastungssystem des heliumgekühlten Hochtemperaturreaktors HTR-1160. Der Primärkreislauf des Reaktors ist für einen Betriebsdruck von 50 bar und einem maximalen Innendruck von 54,5 bar ausgelegt /1/. Zwei redundante Druckentlastungsstränge sollen durch Abblasen des Primärgases in das Reaktorschutzgebäude bei Drucküberschreitungen Schäden im Primärkreislauf verhindern (Abb. 1).

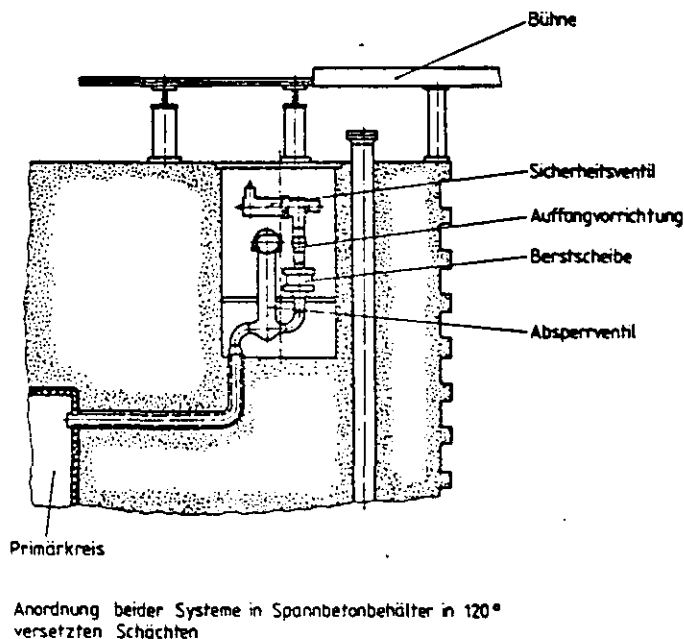


Abb. 1: Anordnung des Druckentlastungssystems (ein Strang) im Reaktordruckbehälter

Da mit dem Kühlgas jedoch Aktivität freigesetzt wird, soll dieser Abblasevorgang auf wirklich vorliegende Drucküberschreitungen beschränkt bleiben. Die Entlastungsstränge müssen also bei normalem Betrieb zuverlässig geschlossen sein. Von dieser Zuverlässigkeit hängt unter anderem nach den Gutachtensbedingungen des Genehmigungsverfahrens /2/ eine Erlaubnis zum Betreten des Reaktorschutzgebäudes bei Reaktorbetrieb ab.

Die Anforderungen an die Druckentlastungsstränge

- zuverlässiges Öffnen bei Überdruck,
- zuverlässiges Abdichten des Primärkreislaufes unterhalb des Ansprechdruckes

werfen gewisse Probleme für die Realisierung eines geeigneten Systems auf, da die beiden Anforderungen komplementäre Eigenschaften beinhalten. Anders ausgedrückt: Das System muß bei einem vorgesehenen Ansprechdruck von höchstens 52,9 bar und einem Betriebsdruck von 50 bar innerhalb eines Druckintervalles von 2,9 bar seine Funktion umkehren.

An drei Varianten des Druckentlastungssystems soll durch Abschätzung mit Hilfe der Fehlerbaummethode der Einfluß der Komponentenanzahl und der gravierende Einfluß von Common-Mode-Fehlerbehandlungen auf die errechneten Zuverlässigkeitswerte für beide Funktionen des Systems aufgezeigt werden.

Mit Common-Mode-Fehlern werden Defekte bezeichnet, die bei identisch aufgebauten redundanten Systemen gleichzeitig und gleichartig in jeder Redundanz auftreten.

'Common-Mode-Fehler' - oder 'Fehler aus gemeinsamer Ursache' - begrenzen die Steigerung der Zuverlässigkeit von redundanten Systemen durch Hinzufügen weiterer Reserveeinheiten. In den Fehlerbäumen werden Common-Mode-Fehler durch ein logisches 'Oder-Gatter' erfaßt, dessen erster Eingang Ausfälle des Systems durch Einzelfehler darstellt und der zweite Eingang Fehler von gemeinsamen Ursachen berücksichtigt.

Sowohl die Methoden zur Erfassung dieser Fehlerart als auch die verwendeten Daten sind häufig Anlaß zu Diskussionen und Kritik. Eine allgemein akzeptierte Lösung des Problems 'Common-Mode-Fehler' läßt sich wohl nicht finden. Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden der Berücksichtigung dieser Fehlerart sind im Anhang beschrieben.

2. ZUVERLÄSSIGKEITSBETRACHTUNGEN VON SYSTEM 1

2.1 SYSTEMBESCHREIBUNG

Das System 1 entspricht dem des 'Probabilistische Sicherheitsstudie für HTR' /3/ zugrunde gelegten 'Entlastungssystem des HTR-1160. In jedem Strang sind (vom Primärkreis aus gesehen) eine motorbetriebene Absperrarmatur, das Sicherheitsventil und eine Berstscheibe hintereinander geschaltet (Abb. 2). Die Berstscheibe soll in diesem System, so wie von der HRB in der letzten Version vorgesehen war, nur Dichtfunktionen übernehmen. Um eine notwendige Druckentlastung nicht durch Streuungen der Ansprechtoleranzen der Berstscheiben zu verzögern, legte der Konstrukteur den Berstdruck mit 20 bar weit unter den Ansprechdruck der Sicherheitsventile. Die Scheiben werden also mit großer Wahrscheinlichkeit zerstört, wenn das Sicherheitsventil öffnet. Die Scheiben werden also mit großer Wahrscheinlichkeit zerstört, wenn das Sicherheitsventil öffnet.

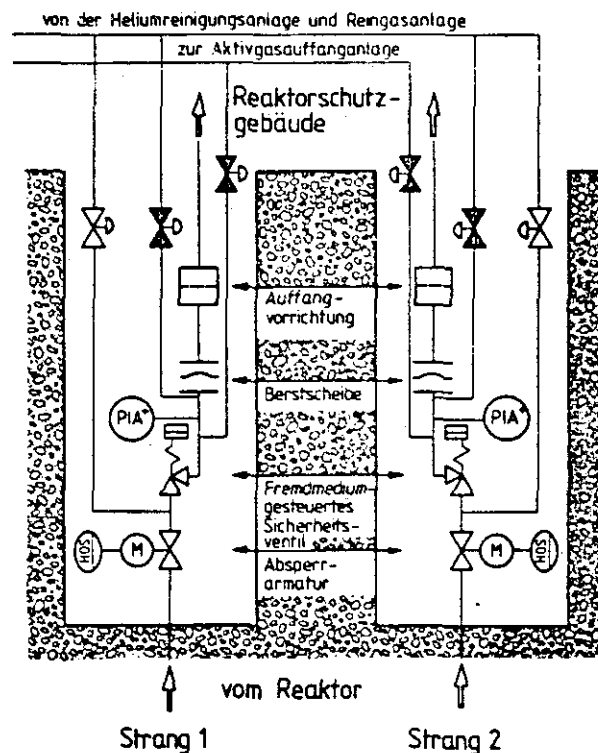


Abb. 2: Schema des Druckentlastungssystems 1

Die motorbetriebenen Absperrarmaturen der beiden Entlastungsstränge müssen bei Reaktorbetrieb ständig geöffnet sein. Sie sind elektrisch so gegeneinander verriegelt, daß stets nur eine Absperrarmatur geschlossen werden kann. Um ein Ventil zu schließen, muß der Operator der Anlage einen Befehl durch Knopfdruck geben.

<p>Sicherheitsventil in System 1 und 3 (ständig belastet)</p>	<p>öffnet nicht, obwohl der Ansprechdruck erreicht ist</p> <p>öffnet, obwohl der Ansprechdruck nicht erreicht</p> <p>schließt nicht nach Öffnen</p>	<p>$3 \cdot 10^{-4}/\text{Anf.}$</p> <p>$1 \cdot 10^{-1}/\text{a}$</p> <p>$4 \cdot 10^{-2}/\text{Anf.}$</p>
<p>Sicherheitsventil in System 2 (belastet nach Brechen der Berstscheiben)</p>	<p>öffnet nicht nach Bersten der Scheiben bei Ansprechdruck</p> <p>öffnet nach vorzeitiger Zerstörung der Berstscheibe unterhalb des Ansprechdruckes</p>	<p>$3 \cdot 10^{-4}/\text{Anf.}$</p> <p>$1 \cdot 10^{-1}/\text{Anf.}$</p>
<p>Berstscheibe in System 2 und 3 (Ansprechdruck bei 52,5 bar)</p>	<p>wird bei anstehendem Ansprechdruck nicht zerstört (System 2 und 3)</p> <p>wird nach Öffnen des SV unterhalb des Ansprechdruckes zerstört (System 3)</p> <p>birst bei Drücken unterhalb des Ansprechdruckes vorzeitig (System 2)</p>	<p>$1 \cdot 10^{-2}/\text{Anf.}$</p> <p>$1 \cdot 10^{-2}/\text{Anf.}$</p> <p>$1 \cdot 10^{-2}/\text{a}$</p>
<p>Berstscheibe in System 1 (Ansprechdruck 20 bar)</p>	<p>birst bei Öffnen des SV</p> <p>birst nicht</p>	<p>$1/\text{Anf.}$</p> <p>$0/\text{Anf.}$</p>

Tabelle 1: Zuverlässigkeitskennndaten der Bauteile für die Druckentlastungssysteme

Das Sicherheitsventil ist fremdmediumgesteuert und wird zur Steigerung der Dichtkraft des Ventilkegels zusätzlich durch einen Pneumatikkolben belastet. Kommt von den Impulsgebern ein Befehl zum Öffnen, so wird die Belastungsluft abgeworfen und gleichzeitig Hubluft unter den Pneumatikkolben geschaltet. Dadurch können kleine Ventilöffnungszeiten eingehalten werden.

Hat ein Ventil vollständig geöffnet, so wird nach Zerstörung der Berstscheibe ein Ausströmquerschnitt von 180 cm^2 frei. Ist der Druck nach Ansprechen eines Ventiles bis auf 85 % des Ansprechdruckes gesunken, so soll das Ventil wieder schließen.

2.2 HÄUFIGKEIT FÜR EIN VERSAGEN DES ENTLASTUNGSSYSTEMS 1 BEI ERREICHEN DES ANSPRECHDRUCKES

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit bzw. der Ausfallhäufigkeit werden die in Tabelle 1 aufgeführten Daten benutzt.

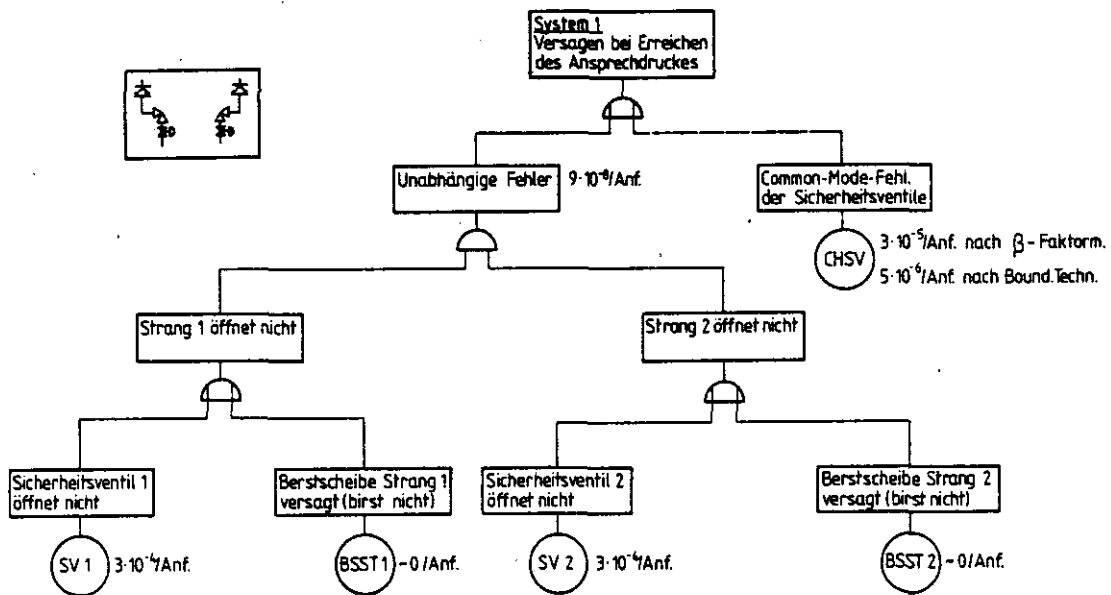


Abb. 3 Fehlerbaum für Versagen des Druckentlastungssystems 1 bei Erreichen des Ansprechdruckes

Der Fehlerbaum des Systems ist sehr einfach (Abb. 3). Es kann bei einer Differenz von 30 bar zwischen Berstdruck und Belastungsdruck beim Öffnen der Sicherheitsventile eine Versagenshäufigkeit von ~ 0 für die Berstscheiben angenommen werden. Damit bestimmt die Zuverlässigkeit der Sicherheitsventile allein die Versagenshäufigkeit. Ohne Unterstellung von CM-Ausfällen ergibt sich mit der Ausfallrate eines Ventiles von $3 \cdot 10^{-4}$ pro Anforderung eine

Nichtverfügbarkeit des Gesamtsystems von $9 \cdot 10^{-8}$ /Anf. für unabhängige Ausfälle beider Stränge. Da die Sicherheitsventile zwar redundant angeordnet, jedoch identisch aufgebaut sind, muß ein mögliches Versagen beider Systeme zum Zeitpunkt der Anforderung aufgrund einer beide Ventile gleichermaßen betreffenden gemeinsamen Ursache angenommen werden.

Die CM-Fehler sollen für den Systemvergleich durch die β -Faktormethode /4/ und durch die Bounding Technique /5/ erfaßt werden.

Für den β -Faktor wird ein Wert von 0,1 angenommen. Die Nichtverfügbarkeit der Sicherheitsventile ist nach der β -Faktor-Methode $NV_{CM\beta} = 3 \cdot 10^{-5}$ /Anf. und nach der Bounding Technique $NV_{CM_{BT}} = 5 \cdot 10^{-6}$ /Anf.

Gegenüber diesen Beiträgen zur Nichtverfügbarkeit sind die unabhängigen Fehler mit $9 \cdot 10^{-8}$ /Anf. vernachlässigbar.

2.3 HÄUFIGKEIT FÜR EINE UNBEABSICHTIGTE DRUCKENTLASTUNG DURCH VERSAGEN DES ENTLASTUNGSSYSTEMS 1

Einige Fehler in der Steuerung und Schaltung des Ventiles können zum unbeabsichtigten Öffnen des Ventiles unterhalb des Ansprechdruckes führen. Schließt das Ventil nicht wieder bei etwa 44 bar (Häufigkeit pro Anforderung $4 \cdot 10^{-2}$), so ist dadurch ein Druckentlastungsstörfall mit einem Ausströmquerschnitt von 180 cm^2 eingeleitet. Die Berstscheibe kann die Druckentlastung bei einem Ansprechdruck von 20 bar nicht verhindern.

Für das vorzeitige Öffnen des Ventiles ist nach GA eine Fehlerrate von $2 \cdot 10^{-5}$ pro Stunde angegeben. Da die Ventile nur während der jährlichen Beladepause getestet werden können, muß ein unbeabsichtigtes Ansprechen mit einer Häufigkeit von $1 \cdot 10^{-1}$ pro Jahr und Ventil erwartet werden. Bei zwei Strängen ist die erwartete Häufigkeit demzufolge $2 \cdot 10^{-1}$ pro Jahr.

Aus dem Fehlerbaum (Abb. 4) errechnet sich so eine Häufigkeit für eine durch das System 1 ausgelöste Druckentlastung bis zum Ausgleichsdruck mit dem Containment von $8 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr.

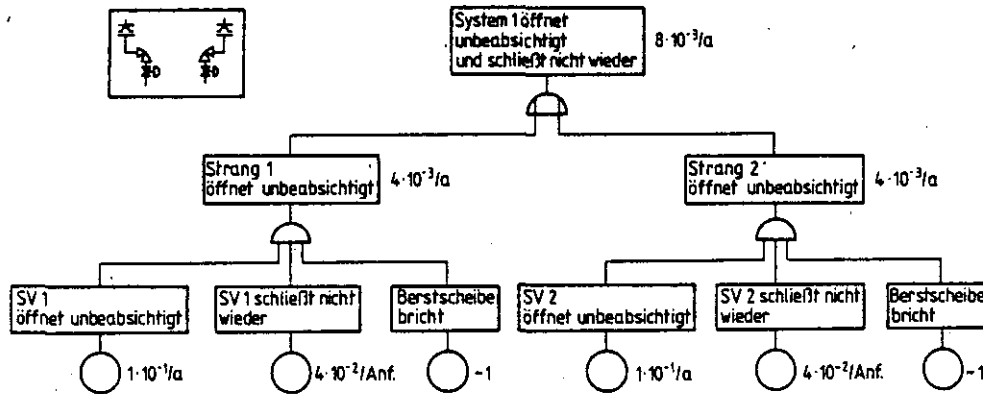


Abb. 4: Fehlerbaum für das Auslösen einer Druckentlastung durch das Druckentlastungssystem 1 unterhalb des Ansprechdruckes

Durch die vorgeschalteten motorbetriebenen Absperrarmaturen kann die Druckentlastung nicht verhindert werden. Die Armaturen schließen nur nach Auslösen eines Schließbefehls durch den Operator. Da das Gas jedoch bereits in etwa drei Minuten ausgeströmt ist, kann mit keinem Operator-Eingriff gerechnet werden.

3. ZUVERLÄSSIGKEITSBETRACHTUNGEN ZU SYSTEM 2

3.1 SYSTEMBESCHREIBUNG

Das System 2 entspricht der ursprünglich im Anlagenkonzept des HTR-1160 vorgesehenen Anordnung. Es unterscheidet sich durch die Reihenfolge von Sicherheitsventil und Berstscheibe (Abb. 1 und 5). Das Sicherheitsventil ist hier der Berstscheibe nachgeschaltet. Aus diesem Grunde muß die Berstscheibe natürlich auf den vollen Sicherheitsdruck des Reaktordruckbehälters ausgelegt sein. Weitere Unterschiede existieren nicht zwischen den Systemen 1 und 2.

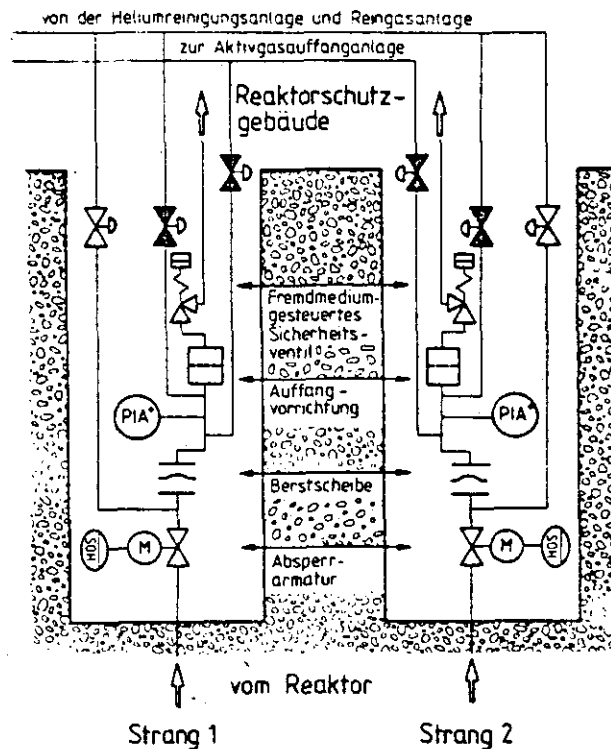


Abb. 5: Schema des Druckentlastungssystems 2

3.2 HÄUFIGKEIT FÜR EIN VERSAGEN DES ENTLASTUNGSSYSTEMS 2 BEI ERREICHEN - DES ANSPRECHDRUCKES

In die Betrachtung des Versagens der Entlastungsstränge bei Erreichen des festgelegten Ansprechdruckes muß bei System 2 die Möglichkeit einbezogen werden, daß die Berstscheiben bis zum Anstieg des Druckes auf den Auslegungsdruck des Reaktordruckbehälters nicht brechen. Das Verhältnis von Berstdruck zu Arbeitsdruck ist etwa 0,94. Es bestehen erhebliche Schwierigkeiten, die engen Toleranzbereiche bei einer Standzeit von einem Jahr und bei Temperaturbelastungen von 340 °C einzuhalten.

Die für das System 2 vorgesehene Berstscheibe arbeitet nach folgendem Prinzip: Bei Ansteigen des Innendruckes wird die Berstscheibe gegen einen mit einer Schneide ausgeführten Ring gedrückt. Bei Erreichen des "Berstdruckes" wird ein kreisförmiges Stück aus der Scheibe abgesichert und damit der geforderte Druckentlastungsquerschnitt freigegeben. Der Berstdruck wird durch Vorspannen der Tellerfeder eingestellt. Zum Prüfen des Berstdruckes wird der Schneide-

ring durch einen Kontaktgeber ersetzt, der den Beginn des Abschervorgangs anzeigt; dabei wird die Berstscheibe nicht zerstört. Die Scheibe kann nur in der jährlichen Abschaltpause nach Demontage des Sicherheitsventiles geöffnet werden.

Für das Versagen der Berstscheibe bei anstehendem Berstdruck ist eine Häufigkeit von $1 \cdot 10^{-2}$ pro Anforderung abgeschätzt worden.

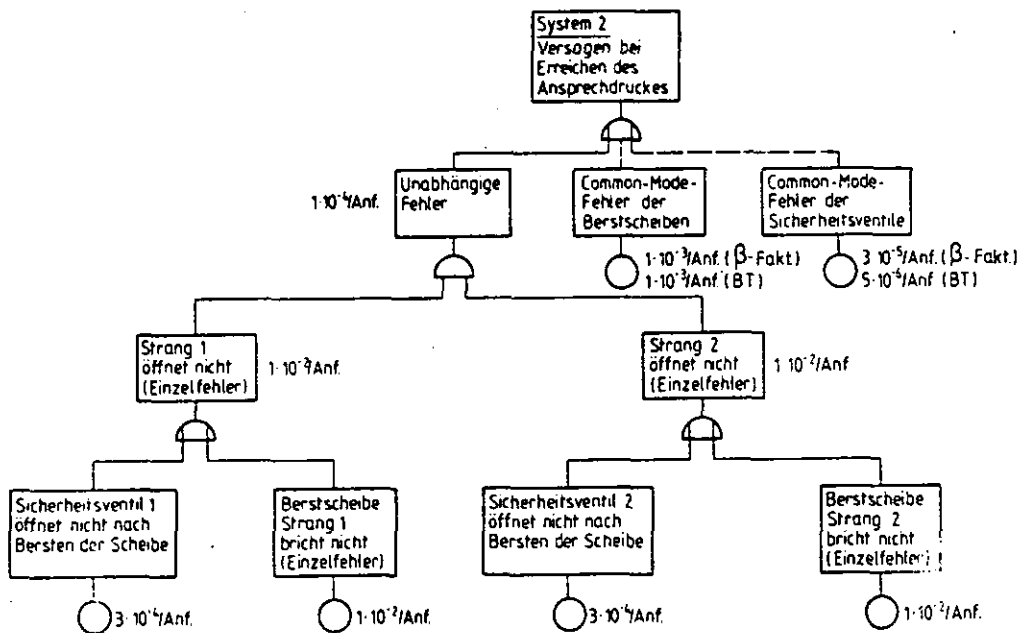


Abb. 6: Fehlerbaum für Versagen des Druckentlastungssystems 2 bei Erreichen des Ansprechdruckes

Unter der Annahme, daß die Berstscheiben identisch sind, muß mit Common-Mode-Fehlern in beiden Strängen des Druckentlastungssystems gerechnet werden. Mit einem β -Faktor von 0,1 ist die Nichtverfügbarkeit der Berstscheiben $1 \cdot 10^{-3}$ pro Anforderung. Die Bounding Technique ergäbe ebenfalls 10^{-3} pro Anforderung.

Um den Druck nach Ansprechen einer Berstscheibe abzubauen, muß das Sicherheitsventil des Stranges öffnen. Für ein Versagen des Öffnens pro Anforderung kann mit der gleichen Häufigkeit wie bei System 1 gerechnet werden.

Aus dem Fehlerbaum der Abb. 6 ist ersichtlich, daß die Nichtverfügbarkeit des Druckentlastungssystems mit CM-Fehler $1 \cdot 10^{-3}$ pro Anforderung und ohne CM-Fehler $1 \cdot 10^{-4}$ pro Anforderung ist. Der Wert wird zu fast 100 % durch Versagen der Berstscheiben bestimmt.

3.3 HÄUFIGKEIT FÜR EINE UNBEABSICHTIGTE DRUCKENTLASTUNG DURCH DAS VERSAGEN DES ENTLASTUNGSSYSTEMS 2

Gegenüber System 1 ergeben sich aus der Sicht der Zuverlässigkeitsanalysen für unbeabsichtigtes Öffnen des Systems 2 zwei wesentliche Unterschiede. Anders als in System 1 wird die Berstscheibe ständig mit dem Betriebsdruck belastet und das Sicherheitsventil wird erst nach Zerstören der Berstscheibe gefordert. Das bedeutet, daß für die Berstscheiben eine Ausfallrate und für die Sicherheitsventile eine Häufigkeit für das Ansprechen nach Öffnen einer Berstscheibe bei Drücken unterhalb des Ansprechdruckes ermittelt werden muß.

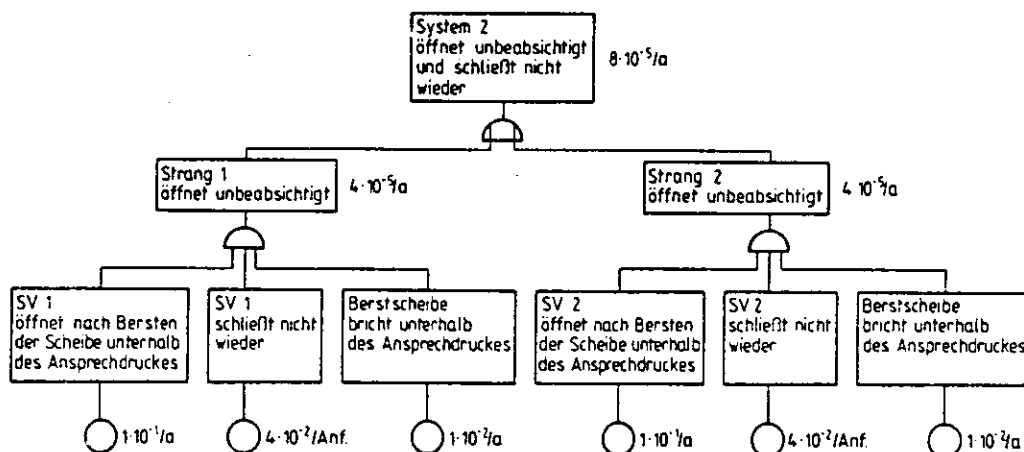


Abb. 7: Fehlerbaum für das Auslösen einer Druckentlastung durch das Druckentlastungssystem 2 unterhalb des Ansprechdruckes

Für ein vorzeitiges Bersten der Scheiben ist eine Rate von $1 \cdot 10^{-2}/a$ abgeschätzt worden.

Durch das plötzliche Bersten wird in dem Verbindungsrohr zwischen Berstscheibe und Sicherheitsventil eine Druckwelle entstehen. Es wird angenommen, daß das über Druckschalter gesteuerte Ventil mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 \cdot 10^{-1}$ öffnet. Ein Druckausgleich zwischen Containment und Reaktordruckbehälter wird jedoch erst möglich, wenn das Sicherheitsventil bei 44 bar nicht wieder schließt. Wie bei System 1 wird mit einer Versagenshäufigkeit von $4 \cdot 10^{-2}$ pro Anforderung gerechnet (Abb. 7).

4. ZUVERLÄSSIGKEITSBETRACHTUNGEN ZU SYSTEM 3

4.1 SYSTEMBESCHREIBUNG

Das System 3 soll wie System 1 angeordnet sein, wobei die dem Sicherheitsventil nachgeschalteten zwei redundanten Berstscheiben je Strang auf den Ansprechdruck von 52,5 bar ausgelegt sein sollen. Ein entsprechendes Schema zeigt Abbildung 8. Diese Anordnung vermeidet die bei System 2 möglichen Belastungen durch Schockwellen.

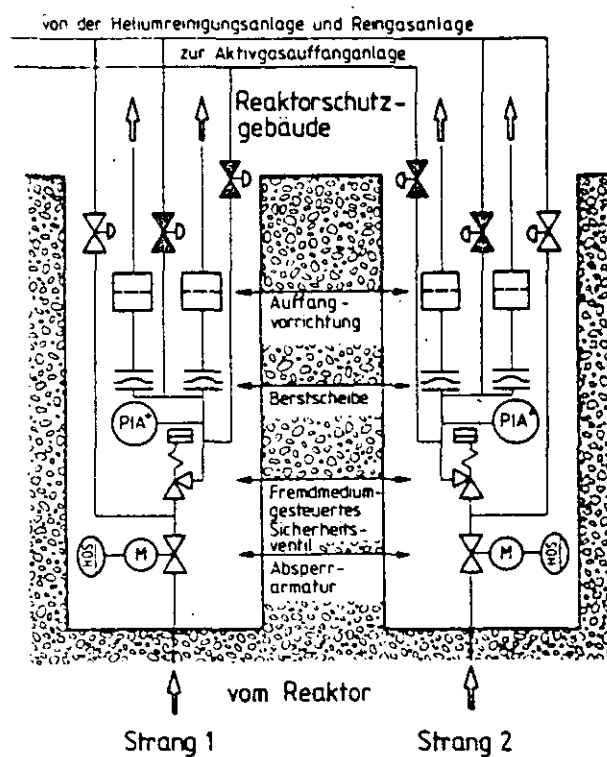


Abb. 8: Schema des Druckentlastungssystems 3

4.1 HÄUFIGKEIT FÜR EIN VERSAGEN DES ENTLASTUNGSSYSTEMES 3 BEI ERREICHEN DES ANSPRECHDRUCKES

Da die Berstscheiben des Systemes 3 auf den Ansprechdruck von 52,5 bar ausgelegt sein sollen, kann die Druckentlastung bei Erreichen des Ansprechdruckes durch Versagen der Sicherheitsventile und durch Versagen der Berstscheiben nach Öffnen der Ventile verhindert werden. Wegen der gleichartigen Bauteile sollen CM-Fehler der Sicherheitsventile und der Berstscheiben unterstellt werden.

Der Fehlerbaum (Abb. 9) ergibt für ein Versagen des Druckentlastungssystems bei erreichtem Ansprechdruck ohne CM-Fehler eine Versagenshäufigkeit von $1,6 \cdot 10^{-8}$ pro Anforderung. Bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $1 \cdot 10^{-2}$ pro Anforderung für Versagen einer Berstscheibe und einem β -Faktor von 0,1 wird die Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems zu über 95 % von der Zuverlässigkeit der Berstscheiben bestimmt. Die Bounding Technique liefert einen vergleichbaren Wert für die CM-Fehler der Berstscheiben.

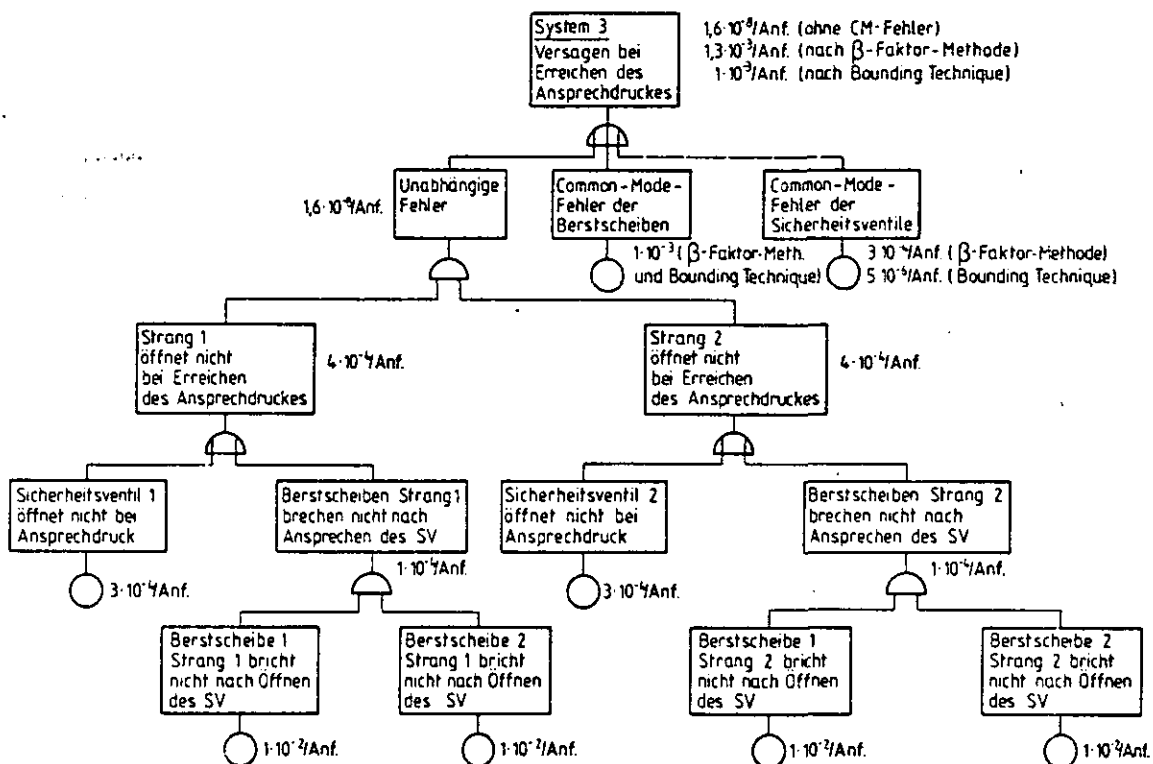


Abb. 9: Fehlerbaum für das Versagen des Druckentlastungssystems 3 bei Erreichen des Ansprechdruckes

Könnte für die Versagenshäufigkeit der Berstscheibe ein Wert von 10^{-3} pro Anforderung erreicht oder ein β -Faktor von 0,01 angenommen werden, so begrenzt der CM-Fehler der Sicherheitsventile mit $3 \cdot 10^{-4}$ pro Anforderung die Systemzuverlässigkeit, wenn mit der β -Fehlermethode gerechnet wird. Die Rechnung mit der Bounding Technique weist mit $3 \cdot 10^{-5}$ pro Anforderung dann immer noch die Berstscheiben als begrenzendes Element der Zuverlässigkeit aus.

4.3 HÄUFIGKEIT FÜR EINE UNBEABSICHTIGTE DRUCKENTLASTUNG DURCH VERSAGEN DES ENTLASTUNGSSYSTEMS 3

Eine unbeabsichtigte Druckentlastung durch System 3 wird ausgelöst, wenn eines der Sicherheitsventile unterhalb des Ansprechdruckes öffnet, eine der Berstscheiben zerstört wird und das Ventil bei Absenken des Druckes auf etwa 44 bar nicht wieder schließt. Common-Mode-Fehler sind ohne Bedeutung, da nicht nach Druckentlastungen über einen Strang oder zwei Stränge unterschieden wird. Aus dem Fehlerbaum (Abb. 10) kann eine Ausfallhäufigkeit von $\sim 2 \cdot 10^{-5}/a$ abgeleitet werden.

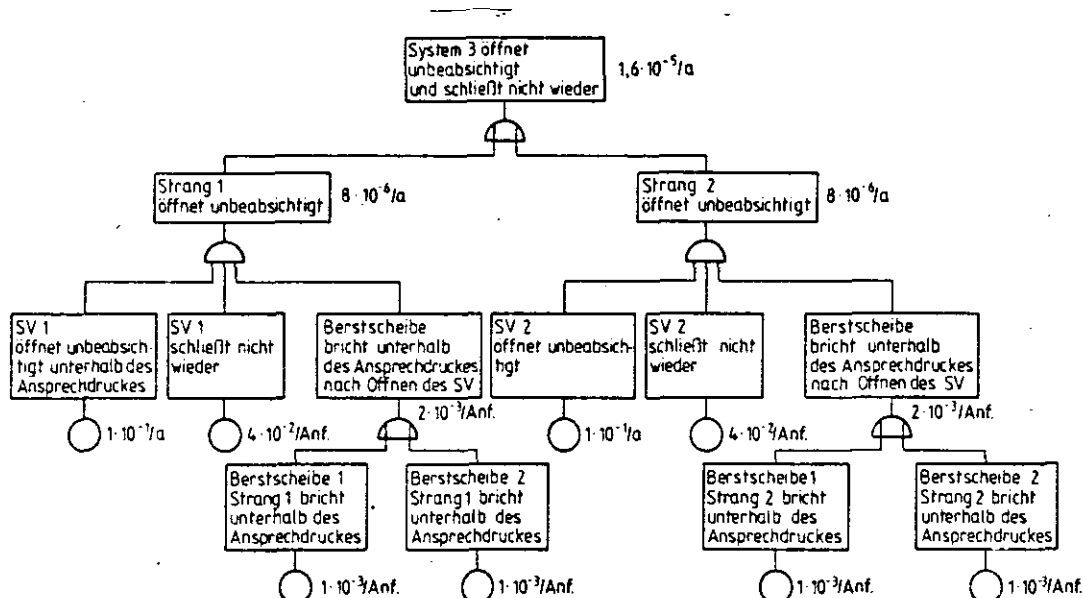


Abb. 10: Fehlerbaum für das Auslösen einer Druckentlastung durch das Druckentlastungssystem 3 unterhalb des Ansprechdruckes

5. BEWERTUNG DER VARIANTEN DER DRUCKENTLASTUNGSSYSTEME

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Um die Zuverlässigkeitswerte für die Systeme und Systemfunktionen richtig einordnen zu können, muß die Häufigkeit der Anforderung einer Druckentlastung aufgrund einer Drucküberschreitung bekannt sein. Ergebnisse, die einen Druckanstieg im Primärkreislauf bis zum Ansprechdruck des Entlastungssystems erzeugen, sind nach der Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte /3/ seltene Ereignisse. Sie

treten mit einer Häufigkeit von maximal 10^{-3} pro Reaktorjahr auf. Eine Ereigniskette mit Druckerhöhung und Versagen der Sicherheitsventile hat demnach in jedem Fall auch unter Berücksichtigung von CM-Fehlern eine Wahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Reaktorjahr. Dabei ist nicht berücksichtigt, daß der Reaktor-druckbehälter auch weit oberhalb des Ansprechdruckes noch nicht versagt, die Wahrscheinlichkeit für das Öffnen der Stränge mit weiter steigendem Druck jedoch zunimmt. Das gilt besonders für das System 2 mit den vorgeschalteten Berstscheiben.

System-varianten	Nichtverfügbarkeit des Druckentlastungssystems bei Erreichen des Ansprechdruckes			Durch das System unbeabsichtigt ausgelaste Druckentlastung unterhalb des Ansprechdruckes
	ohne CM-Fehler	mit CM-Fehler nach B-Faktor-Methode $B = 0,1$	mit CM-Fehler nach Bounding Technique	
System 1	$9 \cdot 10^{-8}/\text{Anf.}$	$3 \cdot 10^{-5}/\text{Anf.}$	$5 \cdot 10^{-6}/\text{Anf.}$	$8 \cdot 10^{-3}/\text{a}$
System 2	$1 \cdot 10^{-4}/\text{Anf.}$	$1 \cdot 10^{-3}/\text{Anf.}$	$1 \cdot 10^{-3}/\text{Anf.}$	$8 \cdot 10^{-5}/\text{a}$
System 3	$2 \cdot 10^{-8}/\text{Anf.}$	$1 \cdot 10^{-3}/\text{Anf.}$	$1 \cdot 10^{-3}/\text{Anf.}$	$2 \cdot 10^{-5}/\text{a}$

Tabelle 2: Zusammenfassung der Zuverlässigkeitskennwerte für die drei untersuchten Systeme

Die Verfügbarkeit der Druckentlastungsstränge zur Verhinderung eines Überdruckversagens ist für jedes System hinreichend gut.

Mehr Beachtung muß jedoch die Möglichkeit einer unbeabsichtigten Druckentlastung des Primärkreislaufes über die Entlastungsstränge finden. Die Systeme 2 und 3 weisen kleine Wahrscheinlichkeiten für ein derartiges Ereignis auf. Mit einer Häufigkeit von $8 \cdot 10^{-3}$ pro Reaktorjahr für eine Druckentlastung über System 1 ergibt sich beim HTR-1160 zwar kein nennenswerter Beitrag zum Risiko; es wäre jedoch hinsichtlich der Verfügbarkeit der Anlage wünschenswert, ein zuverlässigeres System zu wählen.

6. ANHANG

Behandlung von Common-Mode-Fehlern

Als Common-Mode-Fehler werden Defekte in redundanten, identisch aufgebauten Einheiten verstanden, die aus einer alle Redundanzen betreffenden gemeinsamen Ursache in jeder der redundanten Einheiten gleichzeitig auftritt. Ursachen können z.B. sein: Auslegungsfehler, Wartungsmängel, Herstellungsfehler, Bedienungsfehler oder Einflüsse von außen.

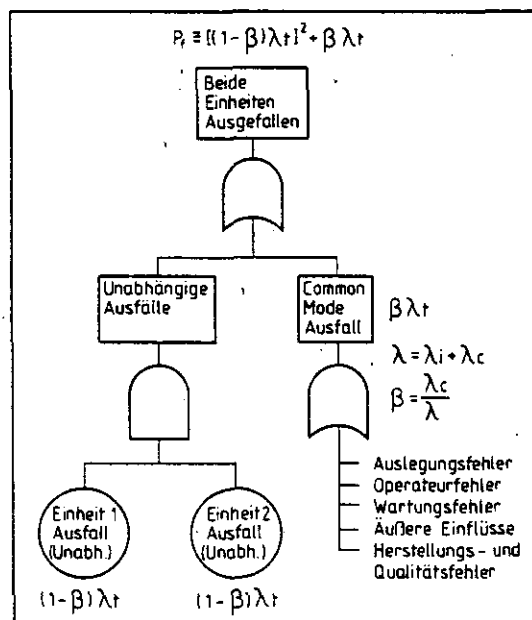


Abb. 11: Berücksichtigung von Common-Mode-Fehlern in den Fehlerbäumen

In den Fehlerbäumen werden die Common-Mode-Fehler durch ein logisches ODER-Gatter berücksichtigt, dessen erster Eingang aus den unabhängigen Fehlern gebildet wird, während der zweite Eingang die Common-Mode-Fehler erfaßt. Ein redundantes System aus zwei Einheiten ist also ausgefallen, wenn beide Einheiten ganz unabhängig ausfallen oder wenn ein Common-Mode-Fehler auftritt.

Zur Quantifizierung dieser Fehlerart sollen die beiden am häufigsten angewandten Methoden beschrieben werden.

Die β -Faktormethode

Der Anwender dieser Methode geht davon aus, daß ein bestimmter Bruchteil (β -Faktor) aller erwarteten Fehler wegen des identischen Aufbaues auch die übrigen redundanten Einheiten des Systems betrifft. Liegt dem Ausfallverhalten der Einheiten eine exponentielle Verteilungsfunktion zugrunde, so errechnet sich die Ausfallwahrscheinlichkeit Q im Zeitraum t zu

$$Q = 1 - e^{-\lambda t}$$

ist die Ausfallrate, die sich aus der Rate der Einzelfehler und aus der Rate der Common-Mode-Fehler zusammensetzt.

$$\lambda = \lambda_E + \lambda_{CM}$$

Da λ_{CM} ein Bruchteil β von λ sein soll, gilt:

$$\beta = \frac{\lambda_{CM}}{\lambda}$$

Für die Abschätzung der Zuverlässigkeitswerte der Systeme ist in dieser Arbeit ein β -Faktor von 0,1 angenommen worden. Das bedeutet, daß jeder 10. Fehler ein Common-Mode-Fehler wäre.

Die 'Bounding Technique'

Die 'Bounding Technique' bestimmt die Wahrscheinlichkeit für Common-Mode-Ausfälle durch geometrische Mittelung der Ausfallwahrscheinlichkeiten, die sich ergeben wenn

- a) die Redundanzen ausgefallen sind, nachdem auch die Einheit mit der kleinsten Ausfallwahrscheinlichkeit ausgefallen ist,

b) die Redundanzen vollständig unabhängig voneinander sind.

Im ersten Fall ergäbe sich

$$Q_a = \text{Min} (Q_1 , \dots Q_n)$$

Im zweiten Fall

$$Q_b = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n$$

Nach geometrischer Mittelung ist dann

$$Q_{CM} = \sqrt{Q_a \cdot Q_b}$$

Bei identisch aufgebauten Redundanzen ist Q_a gleich der Wahrscheinlichkeit für Einzelfehler.

7. VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- Abb. 1: Anordnung des Druckentlastungssystems 2 im Reaktordruckbehälter
- Abb. 2: Schema des Druckentlastungssystems 1
- Abb. 3: Fehlerbaum für Versagen des Druckentlastungssystems 1 bei Erreichen des Ansprechdruckes
- Abb. 4: Fehlerbaum für das Auslösen einer Druckentlastung durch das Druckentlastungssystem 1 unterhalb des Ansprechdruckes
- Abb. 5: Schema des Druckentlastungssystems 2
- Abb. 6: Fehlerbaum für Versagen des Druckentlastungssystems 2 bei Erreichen des Ansprechdruckes
- Abb. 7: Fehlerbaum für das Auslösen einer Druckentlastung durch das Druckentlastungssystem 2 unterhalb des Ansprechdruckes
- Abb. 8: Schema des Druckentlastungssystems 3
- Abb. 9: Fehlerbaum für das Versagen des Druckentlastungssystems 3 bei Erreichen des Ansprechdruckes
- Abb. 10: Fehlerbaum für das Auslösen einer Druckentlastung durch das Druckentlastungssystem 3 unterhalb des Ansprechdruckes
- Abb. 11: Berücksichtigung von Common-Mode-Fehlern in Fehlerbäumen

8. VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Zuverlässigkeitskenndaten der Bauteile für die Druckentlastungssysteme

Tabelle 2: Zusammenfassung der Zuverlässigkeitskennwerte für die drei untersuchten Systeme

9. LITERATUR

- /1/ 1160-MWe-HTR-Demonstrations-Kernkraftwerk Sicherheitsbericht
Konsortium BBC AG und HRB GmbH
Stand 1975
- /2/ Sicherheitsgutachten über HTR-1160 RW-TOV
Februar 1977
- /3/ Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen Standortbedingungen
KFA-ISF, GRS
Juni 1981
- /4/ HTGR Accident Initiation and Progression Analysis Status Report
General Atomic (GA-A13617 Volume II UC-77)
Oktober 1975
- /5/ WASH-1400 Reactor Safety Study U.S. NRC
Oktober 1975